Unterſuchungen am elektroſtatiſchen Relais und am Huth-Johnſen-Rahbek-Lautſprecher.

Inaugural-Diſſertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Naturwiſſenſchaftlichen Fakultät

der

Vereinigten Friedrichs-Univerſität Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Martin Harniſch

aus Magdeburg.

Magdeburg
Buchdruckerei Ferdinand Nahrſtedt
1927

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544303_0023

Unterſuchungen am elektroſtatiſchen Relais und am Huth-Johnſen-Rahbek-Lautſprecher.

Inaugural-Diſſertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Naturwiſſenſchaftlichen Fakultät

der

Vereinigten Friedrichs-Univerſität Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Martin Harniſch

aus Magdeburg.

Magdeburg
Buchdruckerei Ferdinand Nahrſtedt
1927

Referent: Prof. Dr. K. E. F. Schmidt.
Korreferent: Prof. Dr. G. Hertz.
Tag der Promotion: 1. Dez. 1926.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meinen lieben Eltern!

Inhaltsüberſicht.

Seite

A. Das Wichtigſte vom elektroſtatiſchen Relais. 5

B. Unterſuchungen am elektroſtatiſchen Relais und am Huth-Johnſen-Rahbek- Lautſprecher.

I. Wie wirkt der Achat als elektrolytiſcher Halbleiter im elektroſtatiſchen Relais?

a. **Kritik** an der Anſicht Wasziks von der Bedeutung des Halbleiters im elektroſtatiſchen Relais und an der von Kramer behaupteten Gleichrichterwirkung des elektroſtatiſchen Relais. 7

b. Eigene Verſuche.

1. Beſchreibung der benutzten Apparatur, 8
2. Verſuche mit Gleichſpannung über die Abhängigkeit des Syſtemwiderſtandes von der Verſuchsdauer bei verſchiedener Stromrichtung, 9
3. Verſuche mit Wechſelſpannung von 50 Perioden über die Abhängigkeit der Anziehung und des Widerſtandes von der Luftfeuchtigkeit und dem Luftdruck, 11
4. Anziehungs- u. Widerſtandsmeſſungen mit Wechſelſtrom verſchiedener Frequenz. 14

II. Unterſuchungen am Huth-Johnſen-Rahbek-Lautſprecher.

a. Kurze Beſchreibung des Lautſprechers, 17

b. Eigenſchaften des Lautſprechers, von vier Geſichtspunkten aus betrachtet. 18

III. Verſuche, die Achatwalze durch eine Metallwalze mit isolierendem Überzug zu erſetzen. 24

C. Zuſammenfaſſung der Ergebniſſe. 27

Das elektroſtatiſche Relais, das von den beiden däniſchen Ingenieuren Johnſen und Rahbek im Jahre 1917 konſtruiert wurde, ſtellt einen neuen Verſuch dar, elektriſche Wechſelſtröme in mechaniſche Schwingungen umzuſetzen. Sein weſentlicher Unterſchied von dem elektromagnetiſchen Relais beruht darin, daß der Wechſelſtrom in der für techniſche Zwecke wichtigſten Konſtruktion das Relais lediglich ſteuert, während die Arbeit, die der mechaniſche Teil des Relais leiſtet, einer beliebigen anderen Energiequelle entnommen wird. Darin liegt auch der Wert der Anordnung und ihr Vorzug vor dem elektromagnetiſchen Relais. Da das Syſtem mit ſehr geringer Trägheit arbeitet, könnte es ſich zur Konſtruktion von Lautſprechern eignen. **Nur die inkonstante Empfindlichkeit schien zu Beginn der Arbeit einer solchen Verwendung entgegenzustehen. Dafür die Gründe zu erkennen und eventuell zu beseitigen, war der Anlaß zu dieser Arbeit.** Während die Mängel des Syſtems in Teil I und II der Arbeit zunächſt an einer einfachen Anordnung, dann am Lautſprecher ſelbſt unterſucht werden, wird im dritten Teil ihre Umgehung unter Benutzung einer ähnlichen Anordnung verſucht.

Die von den beiden Dänen entdeckte phyſikaliſche Erſcheinung zeigt folgender Verſuch. Eine Platte aus einem Halbleiter-Achat, Solenhofener Schiefer, Marmor – iſt auf einer Seite plan geſchliffen, auf der anderen mit einem Metallüberzug verſehen. Legt man auf die plane Fläche eine ebenfalls eben geſchliffene Metallſcheibe, ſo haften beide Teile feſt aneinander, wenn man zwiſchen Metall und Scheibe eine Spannungsdifferenz (z. B. 100 Volt) legt. Dieſe Anordnung wird in der Literatur als „elektroſtatiſches Relais" bezeichnet, obwohl ſie in dieſer einfachen Form nicht als Relais zu benutzen iſt.

Die dem Verſuch zu Grunde liegende phyſikaliſche Tatſache wurden zu Ehren der beiden däniſchen Entdecker, die ſich auch um die techniſche Verwertung verdient gemacht haben, „Johnſen-Rahbek-Effekt" genannt. Die erſten quantitativen

Verſuche, die man ausführte, indem man die Metallſcheibe an das Ende eines Wagebalkens hängte, während man die Wagſchale am anderen Ende ſo lange beſchwerte, bis die Platte abgeriſſen wurde, ergaben ein etwas ſchnelleres als quadratiſches Anwachſen der Anziehung in Abhängigkeit von der angelegten Spannung. Die **Erklärung der Haftwirkung** iſt in ihren Grundlagen einfach. Auch aufeinander abgeſchliffene Flächen berühren ſich nur an wenigen Stellen. Der Strom findet daher in den ſeltenen ſtromdurchfloſſenen Spitzen und Kuppen an der Oberfläche den größten Widerſtand. Hier liegt das größte Spannungsgefälle im Stromkreis. Da aber die Metallſpitzen im Verhältnis zu den Steinſpitzen einen verſchwindend kleinen Widerſtand haben, iſt weiter faſt die ganze Spannungsdifferenz innerhalb der Spitzen des Halbleiters vorhanden. Wir haben eine hohe Potentialdifferenz über eine kleine Strecke und dementſprechend infolge einer großen Feldſtärke eine ſtarke elektroſtatiſche Anziehung zwiſchen Stein und Platte. Dieſe Kraft folgt dem Geſetz für die Anziehung zweier Kondenſatorplatten:

$$P = \left(\frac{E}{h}\right)^2 \varepsilon \cdot f \cdot A$$

wo P die Anziehungskraft, E die Spannung, h der Plattenabſtand, ε die Dielektrizitätskonſtante, f die Oberfläche einer Platte und A eine Konſtante bedeuten. Die Gleichung verlangt eine quadratiſche Abhängigkeit der Kraft P von E, was der Verſuch auch angenähert beſtätigt.

Obgleich bisher eine Reihe von Arbeiten erſchienen iſt, in denen das elektroſtatiſche Relais nach verſchiedenen Richtungen unterſucht wird, **fehlt bisher eine Arbeit über den Einfluß der Natur der benutzten Halbleiter auf die Anziehung.** Mit der Erkenntnis, daß die benutzten Halbleiter elektrolytiſch leiten, und daß daher Solenhofener Schiefer zwiſchen Metallplatten verſchiedener Art ein Element mit großem inneren Widerſtand darſtellt, ſind eigentlich die Unterſuchungen erſchöpft, wenn man von der von Kramer behaupteten Gleichrichterwirkung (Zs. f. Ph. 27, 74; 1924), die ich noch in einem beſonderen Abſchnitt behandeln möchte, abſieht. Im übrigen wird ſtets allgemein der Einfluß der Feuchtigkeit der Luft auf die Meſſungen betont, ohne daß er bisher ſyſtematiſch behandelt iſt; darum verſuchte ich im erſten Teil meiner Arbeit für den Achat die Frage zu beantworten: **Wie wirkt der Achat als elektrolytiſcher Halbleiter im elektroſtatiſchen Relais?**

I. Teil der Arbeit.

Wie wirkt der Achat als elektrolytiſcher Halbleiter im elektroſtatiſchen Relais?

Bevor ich jedoch zu einer Schilderung der eigenen Verſuche übergehe, möchte ich in zwei Punkten an den bisher veröffentlichten Arbeiten Kritik üben, zunächſt an der Auffaſſung Wasziks (Zs. f. techn. Ph. 5 29-31; 1924), daß die Halbleiter „nur Schutzwirkung" hätten.

Waszik unterſucht in ſeiner Arbeit die Anziehung zweier eben polierter Metallplatten. Er zeigt, daß, wenn man zwei glänzend ohne Streifen polierte Metallflächen unter größter Vorſicht aufeinander legt, 200 Volt angelegt werden können, ohne daß metalliſche Berührung eintritt. Dabei beträgt der Übergangswiderſtand bei ſeinen Unterſuchungen 10^7 Ohm pro cm^2 Die Anziehung iſt von derſelben Größe wie beim elektroſtatiſchen Relais. Wenn Waszik recht hätte, müßten zwei Metallplatten mit Schutzwiderſtand davor die gleichen Eigenſchaften wie das elektroſtatiſche Relais haben. Der Unterſchied beſteht jedoch darin, daß beim elektroſtatiſchen Relais die Anziehung auch dann beſtehen bleibt, wenn die Platten feſt aufeinander gedrückt werden. **Wasziks Anſicht trifft alſo inſofern nicht zu, als ſie in ihrer Einfachheit die ſpezifiſche Bedeutung der Steinſpitzen vernachläſſigt.** Sie ſpricht nur von einer Wirkung des Steines als Schutzwiderſtand, während der Einfluß des ſpezifiſchen Widerſtandes des Materials für das Spannungsgefälle und damit für die Anziehung nicht berückſichtigt wird.

Anlaß zu einer Nachprüfung wurden dann noch die weittragenden Folgerungen, die Kramer aus ſeinen in der Zeitſchrift für Phyſik (27, 74-82; 1924) veröffentlichten Verſuchen zieht Kramer hat in einer Reihe von Meſſungen gezeigt, daß bei Gleichſpannung der das Relais durchfließende Strom in ſeiner Stärke von der Richtung der angelegten Spannung abhängig iſt. Die Verſuche wurden ſo angeſtellt, daß nach Anlegen der Spannung 30 Sekunden gewartet, dann die Stromſtärke abgeleſen wurde. Weiter wurde die Spannung nach jeder Ableſung umgepolt. Das Verhältnis der Ströme in beiden Richtungen bezeichnet er als Gleichrichterverhältnis; die Größe des Stroms erwies ſich als abhängig von der Zeit nach Anlegen der Spannung. Herr Kramer zieht alſo auf Grund von Gleichſtrom

meſſungen den Schluß auf einen Gleichrichtereffekt, der ſich gerade bei Wechſelſtrömen nachweiſen laſſen müßte.

Eigene Verſuche mit Wechſelſtrom zeigten aber, daß eine Gleichrichtung von Wechſelſtröme nicht eintritt. **Während ſich jederzeit die unter Verwendung von Gleichſpannung mitgeteilten Reſultate beſtätigen ließen, konnte ich nie bei Benutzung von Wechſelſtrom eine Gleichſtromkomponente beobachten.** Die Übereinſtimmung unſerer mit Gleichſpannung gewonnenen Reſultate erleidet nur inſofern eine Einſchränkung, als unter Benutzung ſeiner bereits beſchriebenen Meßmethode meiſtens, jedoch nicht immer, bei mir auch in Richtung Metall-Achat der Strom langſam ſtieg, während er bei Kramers Verſuchen langſam geringer wurde. Meine Wechſelſpannungsverſuche führte ich mit 60 Volt Wechſelſpannung von 50 und 220 Perioden unter Benutzung eines Drehſpulenſpiegelgalvanometers von Siemens & Halske (Geſamtwiderſtand 1000 Ohm, 1 cm Ausſchlag : $1 . 10^{-8}$ Amp.) als Gleichſtrominſtrument aus. Zu dieſem lagen 20 MF parallel und in Reihe die Hochſpannungswindungen eines Telefonübertragers, die verhindern ſollten, daß die Wechſelſtröme über das Inſtrument floſſen. Die Verſuche wurden mit Platten aus Nickel, Meſſing, Silber und Aluminium ausgeführt. Die Unterſeite des Achats war kathodiſch verſilbert.

Meiner Anſicht nach muß man die von Kramer beobachteten Unterſchiede als eine Folge des langen Stromüberganges in einer Richtung auffaſſen. Vielleicht ſpielt hier die verſchiedene Größe der mit dem Stein in Verbindung ſtehenden Metallflächen die ausſchlaggebende Rolle; denn während auf der einen Seite ein Silberbelag feſt anliegt, berührt der Stein auf der anderen Seite das Metall nur in wenigen Punkten. Mit einer Gleichrichterwirkung haben jedenfalls ſeine Meſſungen meines Erachtens nichts zu tun.

Die Beſchreibung der eigenen Verſuche beginne ich mit einer **Schilderung der benutzten Apparatur.** Als Halbleiter diente Achat, der wegen ſeiner Härte und Poliurfähigkeit techniſch vor allem in Frage kommt. Verwandt wurde eine im Mittel 2,1 cm dicke, kreisrunde Scheibe von 6,4 cm Durchmeſſer. Das benutzte Stück war eine durch Eiſenoxyd rotgefärbte Varietät mit unauffälliger Bänderung. Es wurde vom Mineralogiſchen Inſtitut der Univerſität Halle zur Verfügung geſtellt. Die untere Seite wurde kathodiſch verſilbert, die obere mit einer Platte aus Elektrolytnickel von 5,8 cm Durchmeſſer zuſammen erſt mit Schmirgel, dann mit Bimsſteinpulver abgeſchliffen, ſo daß beide Flächen gut aufeinander paßten.

Die benutzte Apparatur entstand nach folgenden Gesichtspunkten:

1. Sie mußte es ermöglichen, in einer bestimmten Atmosphäre zu arbeiten.
2. Stein und Platte mußten vor Staub möglichst geschützt werden.
3. Der Druck, mit dem die Platte vor jedem Versuch auf den Stein gedrückt wurde, mußte konstant sein.
4. Es war erwünscht, daß die Platte bei jedem Versuch wieder in dieselbe Lage zum Stein kam, wie beim vorhergehenden.

Sie befand sich in einer Glasglocke (1*) eingebaut, die bereits vorhanden war. Die Wage wurde durch einen Elektromagneten ersetzt, dessen Eisenkern (2) in einem Glasrohr (3) steckte, das oben durch einen Gummistopfen (4) verschlossen wurde. Über das Glasrohr wurde die Spule des Elektromagneten (5) geschoben, die auf ein doppelwandiges Messingrohr (6) gewickelt war; der Mantel wurde bei Betrieb zur Kühlung von Wasser durchflossen. Der Stein (7) wurde auf einer justierbaren Platte mit drei Schrauben festgespannt. Auf dem Stein lag die Metallscheibe (8), die sich in einer Führung von drei Stiften (9), von denen nur zwei gezeichnet sind, nur in senkrechter Richtung bewegen konnte. Sie stand mit dem Eisenkern des Magneten durch einen dünnen Stahldraht (10) in Verbindung; dieser befand sich in einem Messingrohr (11), das mit dem Kern starr verbunden war. Im stromlosen Zustand der Spule drückte der Eisenkern durch das Rohr die Metallscheibe mit seinem Gewicht auf dem Stein fest. Die Führungsstifte dienten zugleich als Anschlag bei Anziehen der Platte.

Ich untersuchte zunächst **die Abhängigkeit der Leitfähigkeit des Systems von der Dauer des Stromdurchgangs bei Gleichspannung** in beiden Stromrichtungen. Solche Versuche sind insofern von Interesse, als sie zeigen, wie sich der Übergangswiderstand der unberührten Anordnung bei Stromfluß ändert. Sie liegen also in derselben Richtung wie die Messungen von Kramer, unterscheiden sich aber dadurch von jenen, daß **ein Versuch** nicht nur über einige Minuten, sondern **über viele Stunden mit unveränderter Stromrichtung** ausgedehnt wurde. Unter solchen Umständen erhält man die von jenem erwähnten Abscheidungsprodukte in größeren Mengen und kann so ein klareres Bild von der Art der Stromleitung bekommen.

---

* Die eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf Figur 1a. Sämtliche Figuren befinden sich im Anhang.

Bei den Verſuchen wurde eine Gleichſpannung von 200 Volt benutzt. Sie wurde ſo hoch gewählt, damit Polariſationsſpannungen nicht mehr ſtören konnten. Die 40 gr ſchwere Nickelplatte war mit 100 gr beſchwert.

Verſuche in Stromrichtung Stein-Platte, z. B. einer mit 200 Volt über 6 Stunden, ein anderer über 31 Stunden erſtreckt, ergaben folgendes Bild. **Der Strom ſteigt** zu Beginn des Verſuches von einem geringen Anfangswert, der ſich nicht meſſen läßt, weil der Strom zu ſchnell ſteigt, **erſt ſchneller, allmählich langſamer werdend, bis er nach circa 1½ Stunden den höchſten Wert erreicht hat** — in unſerem Falle 10^{-5} Ampere. **Dann beginnt er wieder langſam zu ſinken.** Bei einem dritten Verſuch war er nach 30 Stunden auf die Hälfte ſeines höchſten Wertes gefallen.

Nach dem Auseinandernehmen zeigten ſich jedesmal auf beiden Oberflächen feuchte Stellen, die auf Lakmuspapier alkaliſch reagierten und die nichtleuchtende Flamme eines Bunſenbrenners mit der Farbe der K- und Na-Ionen färbten. Erdalkalien konnten nicht feſtgeſtellt werden. Mit der Zeit trockneten die feuchten Stellen ein unter Hinterlaſſung von Salzkriſtallen, die beim Betupfen mit Eſſigſäure CO_2 entwickelten.

Ein weſentlich anderes Bild zeigt ſich, wenn wir die Stromrichtung umkehren, alſo die Metallplatte zum poſitiven Pol machen. Auch dann ſteigt der Strom, und zwar wurde in einem 20-ſtündigem Verſuch kein Maximum erreicht. Im Gegenſatz zur entgegengeſetzten Stromrichtung ſchwankt die Intenſität des Stromes ſtark.

Nach dem Verſuch zeigten ſich **auf beiden Oberflächen ſchwarze, lockere Hügel aus metalliſchem Nickel,** eine Beobachtung, die auch Kramer gemacht hat. Die größeren befanden ſich auf der Nickelplatte und waren von grünen Nickelſalzkriſtallen umgeben. Die größten waren oben abgeplattet, als ob ſie dort an die Steinoberfläche gegrenzt und ſo eine metalliſche Brücke zwiſchen Nickelſcheibe und Achat gebildet hätten (vergl. Angelika Szekely, Zs. f. Ph. 22, 51-69 1924).

Für die Erklärung der Erſcheinung verweiſe ich auf die Kramerſche Arbeit. Sie nimmt ein Abreißen von Metallionen infolge der hohen Feldſtärke an. Einfach ſcheint der Vorgang jedoch nicht zu ſein; denn es findet, wie geſagt, auf der Nickeloberfläche ſelbſt eine Haufenbildung ſtatt, die man vielleicht durch Auflockerung des Materials erklären könnte, die ſich aber im Ausſehen nicht von den Haufen auf der entgegengeſetzten

Seite unterſcheidet. **Den Vorgang der Brückenbildung ſtelle ich mir nach meinen Beobachtungen so vor.** Es reißen ſich Nickelionen von der Metalloberfläche los und ſetzen ſich auf dem Stein feſt. Zu gleicher Zeit lockert ſich das Material der Metalloberfläche an dieſen Stellen auf. Von zwei Seiten wachſen nun zwei Hügel gegeneinander, deren Kuppen ſich ſchließlich vereinigen und ſo eine Brücke zwiſchen beiden Materialien bilden. Die Entſtehung der Nickelſalzkriſtalle erklärt ſich daraus, daß bei dieſer Stromrichtung die Säurereſte zum Nickel wandern und ſich mit ihm vereinigen, ſodaß ſchließlich Nickelſalz an den Stellen des Stromüberganges auskriſtalliſiert. Die abgeſchiedene Salzmenge war leider zu gering, um die Natur der Anionen daraus durch Analyſe zu erkennen. **Die Brücken drücken die beiden Flächen, zwischen denen sie sich bilden, auseinander.** Ich konnte dieſe Erſcheinung in mehreren Fällen einwandfrei beobachten und maß in einem Falle nach dem Verſuch einen Abſtand zwiſchen beiden Platten von circa $1 \cdot 10^{-2}$ cm.

Beim Anlegen einer Wechselspannung von 100 — 200 Volt konnte niemals eine Zerstörung der Oberflächen wahrgenommen werden.

Da alſo Wechſelſpannung vor Gleichſpannung den Vorzug hat, daß ſekundäre Erſcheinungen nicht eintreten, wurde **zur Bestimmung des** im folgenden zu beſchreibenden **Einflusses der Feuchtigkeit und des Luftdruckes auf die Anziehung 50 periodischer Wechselstrom** benutzt.

Figur 1 zeigt dieſe Abhängigkeit. Ordinate iſt die dem Magnetſtrom entſprechende Anziehungskraft, die man anwenden muß, um bei 70 Volt Wechſelſpannung die Platte abzureißen. Als Abſciſſe iſt die Verſuchsdauer eingetragen. Zwiſchen den Meſſungen lag die Platte nicht auf dem Achat auf. Die Kurve iſt an fünf Stellen, die mit I, II uſw. bezeichnet ſind, unterbrochen. Zwiſchen der letzten Meſſung vor jeder Unterbrechungsſtelle und der erſten danach wurden nacheinander folgende Eingriffe vorgenommen:

I. Einbringen einer flachen Schale mit P_2O_5 in die mit Zimmerluft gefüllte Glocke.

II. Das P_2O_5 wird durch Übergießen mit Paraffinöl unwirkſam gemacht und eine bisher verdeckte Schale mit Waſſer geöffnet.

III. Das Waſſer wird mit einer Kapſelpumpe (bis 3 mm Hg-Druck) weggepumpt.

IV. Die Pumpe wird abgeſtellt und die Zimmerluft eingelaſſen.

V. Ein zweites Gefäß mit Waſſer wird aufgedeckt.

Die Eingriffe wurden durch den in der Zeichnung linken Tubus vorgenommen. Das Syſtem blieb alſo dadurch ungeſtört.

Wir ſehen aus dem Verſuche folgendes:

a) Sowohl in trockner wie auch in mit Wasserdampf gesättigter Luft ist die Anziehung gering

b) Beim Übergang vom einen zum andern Zustand erreicht die Haftwirkung ein Maximum.

c) Ein Maximum tritt auch auf, wenn man, von dem feuchten Zustand ausgehend, die Luft wegpumpt.

Wie ſich der Gleichſtromwiderſtand des Relais unter ſolchen Umſtänden verhält, mögen die beiden Figuren 2 und 3 erläutern.

Die Spannung beträgt in beiden Fällen 80 Volt. Der Widerſtand wurde mit 10 Volt Gleichſpannung in Richtung Platte-Stein beſtimmt. Infolge der Abhängigkeit des Stromes von der Zeit und der Stromrichtung kann man aus den Zahlen nur den Verlauf der Widerſtandskurven erſehen, während die Zahlenwerte ſelbſt nicht mehr als die Größenordnung des Widerſtandes angeben können. Bei den Widerſtandsmeſſungen lag die Gleichſpannung nur ſolange an (20 sek), als zur Meſſung unbedingt nötig war. In der Zeit zwiſchen den einzelnen Meſſungen lag die Nickelplatte nicht auf dem Stein auf. Zu der Figur 2 iſt zu bemerken, daß im Verlauf der Meſſung die Glocke zunächſt langſam bis auf 3 mm Hg-Druck ausgepumpt wurde, und daß darauf wieder langſam Luft eingelaſſen wurde. Welche Widerſtands- und Anziehungskurven zuſammengehören, iſt aus den Pfeilen erſichtlich. Von 10 zu 10 cm Druckdifferenz verſtrichen 10 Min. Die zu den einzelnen Drucken gehörigen Werte ſollen nicht Endwerte für den betreffenden Druck darſtellen, ſondern nur zeigen, wie **bei langsamem Auspumpen der Widerstand des Systems zunimmt, während die Anziehung immer schwächer wird.** Figur 3 zeigt, wie **nach Einstellen einer Schale mit Wasser in die mit Zimmerluft gefüllte Glocke sowohl Anziehung wie auch Widerstand stark absinken.**

Dieſe Verſuche zeigen mit ihrer ſtarken Veränderlichkeit von Anziehung und Widerſtand deutlich, daß man für das elektroſtatiſche Relais nicht mit dem Schema Steinwiderſtand mit hintereinandergeſchalteter Stromverzweigung auskommt, in deren einem Zweig eine Kapazität, gebildet von den beiden

Oberflächen, und in deren anderem ein ohmscher Widerstand, dargestellt durch die Steinspitzen, liegt. Doch ist eine **Erklärung der beschriebenen Erscheinungen** nicht schwierig, wenn man daran denkt, daß der Achat aus einem Gefüge mikroskopisch kleiner Chalcedon- und Quarznädelchen besteht, in deren kapillaren Zwischenräumen sich Feuchtigkeit befindet. Sie ist es, die die Elektrizitätsleitung höchst wahrscheinlich vermittelt. Unter dieser Voraussetzung nehme ich an, daß der **Einfluß der** an Wasserdampf meist ungesättigten **Außenluft in einer mehr oder minder starken Austrocknung der Kapillaren an der Steinoberfläche** besteht. Austrocknung hätte Vermehrung des Widerstandes zur Folge, was der Versuch bestätigt. Die gesamte Potentialdifferenz würde dann nicht nur in der Übergangsschicht liegen, sondern es würde auch im Stein ein wesentlicher Spannungsabfall vorhanden sein. Ebenso sprechen für diese Annahme die Versuche unter vermindertem Druck. Zur Erklärung der geringen Anziehung in feuchter Luft möchte ich das Verhalten der Stein- und Metalloberfläche bei wechselnder Feuchtigkeit heranziehen. In den Arbeiten von Rottgardt und Schering und Schmidt wird aus den Anziehungsversuchen ein mittlerer Abstand der beiden Oberflächen von ungefähr $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ cm errechnet, eine Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = 1$ vorausgesetzt. Ein gleiches Ergebnis zeigen meine Versuche in Zimmerluft. Diese Zahlenangaben können aus drei Gründen keinen Anspruch auf Genauigkeit erheben:

1. geht der Abstand nicht linear, sondern quadratisch in die Anziehungsformel ein, was auf das Resultat von Einfluß ist, da es sich nicht um zwei Kondensatorplatten mit konstantem, sondern schwankendem Abstand handelt.
2. kann infolge des Stromflusses das Potential nicht auf der ganzen Fläche dasselbe sein. Wie weit dadurch der erste Fehler kompensiert wird, läßt sich nicht feststellen, weil man die Oberflächenverhältnisse nicht kennt.
3. berühren sich wenigstens bei meinen Versuchen die 26 cm^2 großen Oberflächen nur im Gebiet einiger cm^2, was man an der Metallplatte sehen konnte, wenn man sie etwas auf der Achatscheibe rieb.

Den Grund für die schlechte Anziehung in feuchter Luft suche ich nun in dem **ausschlaggebenden Mitwirken der Oberflächenhäute,** wobei ich mich auf die Annahme stütze, daß in dem Kontaktgebiet der Oberflächen, auf das es im folgenden ankommt, der mittlere Abstand bei Zimmerluft wesentlich kleiner als $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ cm ist. Als erster hat wohl

Rohmann (Phys. Zs. 21, 699) ſolche Häute auf Metallflächen unterſucht. Er unterſcheidet zwei übereinanderliegende Schichten, „eine äußere, in der eine Kontakt-E.M.K. wirkſam iſt", – nämlich wenn man zwei Metallflächen aus verſchiedenem Metall einander nähert – „die daher aus einem Elektrolyten beſteht, ferner eine innere, welche die Mikrophonwirkung verurſacht. Für die letztere iſt elektrolytiſche Leitung ſehr unwahrſcheinlich, in ihr verhält ſich jedenfalls die Berührung ſchon wie eine metalliſche." Der Übergang zwiſchen beiden Schichten iſt ſehr plötzlich. Die Dicke der äußeren Schicht ſetzt er zwiſchen 1 und $10 \cdot 10^{-5}$ mm ſchwankend an. Er gibt an, daß die Dicke auch ohne beabſichtigte Einwirkung ſtark ſchwankte. Ihre Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit wurde von ihm nicht unterſucht. Bei Anhauchen wuchs die Dicke der ſpannungsliefernden Schicht bis zu vielen 10^{-4} cm. Unter ſolchen Umſtänden erſcheint es glaubhaft, daß der Übergangswiderſtand durch Vergrößerung der Kontaktfläche und vermehrte Oberflächenleitung bis zur Größe des in Serie liegenden Steinwiderſtandes abnimmt. Eine Verminderung der Spannung an der Übergangsſchicht um die Hälfte hätte aber bereits ein Sinken der Anziehung auf den vierten Teil, unveränderte Oberflächenverhältniſſe vorausgeſetzt, zur Folge.

Solange man ſich auf Gleich- und Wechſelſpannungsverſuche von 50 Perioden beſchränkt, bieten ſich der Erklärung keine weſentlichen Schwierigkeiten. Das wird anders, wenn man **Untersuchungen mit verschiedenen Frequenzen** vornimmt und verſucht, die gemeſſene Frequenzabhängigkeit der Anziehung zu erklären. Dabei iſt es zunächſt notwendig, **die Größe des reinen Steinwiderstandes** zu kennen. Zu dieſem Zweck wurde der Achat oben und unten graphitiert, und darauf Stanniol mit Hühnereiweiß auf die beſtrichenen Flächen geklebt, um guten Kontakt zu erhalten. Die Meſſung des Widerſtandes geſchah hier wie in allen ſpäteren Fällen dieſes Abſchnitts auf folgende Art. Der zu meſſende Widerſtand wurde in Reihe mit einer bekannten Kapazität an die Wechſelſpannung gelegt. Aus den Teilſpannungen und der Geſamtſpannung, die mit einem Wulffſchen Zweifaden-Elektrometer gemeſſen wurden, ließen ſich dann mit Hilfe des Impedanzdreieckes der ohmſche und der kapazitive Teil des unbekannten komplexen Widerſtandes leicht graphiſch ermitteln. Die folgende Tabelle zeigt die auf dieſe Weiſe gewonnenen Daten des Steinwiderſtandes:

Per./sek.	R^{I}_{O}	R^{I}_{K}	W^{I}	C^{I}	C^{I} in cm	ϱ
50	54000 Ohm	3500 Ohm	54000 Ohm	$3{,}9 \cdot 10^{-10}$ F	350 cm	290
220	55000 „	1600 „	55000 „	3,8. „	340 „	280
520	57000 „	1700 „	57000 „	1,6. „	145 „	120
1160	55000 „	1650 „	55000 „	$7{,}5 \cdot 10^{-11}$ F	67 „	56
3000	49000 „	1600 „	49000 „	3,55. „	32 „	26

Hierbei bedeuten $R^{I}O$ und $R^{I}K$ die graphisch gewonnenen ohmschen und kapazitiven Komponenten des Steinwiderstandes. W^{I} und C^{I} stellen ohmschen Widerstand und Kapazität einer Stromverzweigung gleichen Gesamtwiderstandes dar, wobei ein Zweig rein ohmisch, der andere rein kapazitiv ist. $R^{I}R$ und $R^{I}O$ haben hier direkt keinen physikalischen Sinn, wohl aber W^{I} und C^{I} als Widerstand und Kapazität des Achats. ϱ entspricht formal der aus Dicke und Oberfläche der Steinplatte zu errechnenden Dielektrizitätskonstante, kann aber wegen der Frequenzabhängigkeit damit nicht identifiziert werden. Man sieht, daß man bei dieser Vorstellung zu der Annahme einer **starken Anomalie des Dielektrikums** infolge der Frequenzabhängigkeit von C^{I} kommt, eine Feststellung, die auch Schering und Schmidt an Sohlenhofener Schiefer (Zs. f. techn. Ph. 1925, 19-27 Heft 1) machten. Ob man ihnen wegen des enorm hohen ϱ's bei niedrigen Frequenzen darin zustimmen soll, daß „an der Grenzschicht zur Elektrode eine ionenarme Schicht, also eine Schicht hohen Widerstandes auftritt", lasse ich dahingestellt. Im übrigen sind die Werte von C^{I} und ϱ zu ungenau, um aus den Anomalien weittragende Folgerungen über die Art des Stromflusses im Relais aufzubauen. Sie waren nicht genauer zu ermitteln, da $R^{I}K$ gegenüber $R^{I}O$ zu klein ist.

Dieser Umstand hat andererseits den Vorzug, daß der Stein für die Messungen am gesamten System in erster Näherung als ohmscher Widerstand von rund 55000 Ohm Größe aufgefaßt werden kann. Die beiden ineinander gesetzten Figuren 4 und 5 enthalten die experimentellen Ergebnisse einer solchen zusammenhängenden Meßgruppe. Die Kurven 1a, 2a u. 3a von Figur 4 entsprechen den ohmschen, 1b, 2b und 3b den kapazitiven Komponenten des Systemwiderstandes, abzüglich der Komponenten des reinen Steinwiderstandes. Sie stellen also den außer $R^{I}O$ und $R^{I}K$ noch vorhandenen Widerstand $R^{II}O$ und $R^{II}K$ abhängig von der Frequenz dar, mit der er gemessen wurde. Dabei gehören 1a und 1b, 2a und 2b, 3a und 3b zusammen. Sie entstanden durch verschiedene Vorbehandlung des Systems. 1a und 1b

ſtellen das Verhalten in lange mit P_2O_5 getrockneter Luft dar, 3a und 3b das Verhalten in feuchter Luft und 2a und 2b einen Zwiſchenzuſtand, nämlich den der Zimmerluft an dem betreffenden Tage. Zu 1a und 1b gehört noch die Kurve A, zu 2a und 2b die Kurve B in Figur 5. Bei ihnen iſt nicht wie bisher die zu einer konſtanten Spannung gehörige Abreißkraft als Ordinate aufgetragen, ſondern aus meßtechniſchen Gründen die zu einer konſtanten Abreißkraft von 80 gr gehörige Spannung. Im feuchten Zuſtand war eine Anziehung nicht feſtzuſtellen. Wie zu erwarten, iſt **in trockner Luft der ohmsche und kapazitive Widerstand $R^{II}O$ und $R^{II}K$ am größten, in mit Wasserdampf gesättigter am kleinsten.** Ebenſo beſtätigen die Anziehungsverſuche die mit 50 Perioden gemachten Erfahrungen. Die Frequenzabhängigkeit der Anziehung iſt eine Folge der Frequenzabhängigkeit des Übergangswiderſtandes; denn die kapazitive Leitfähigkeit der Übergangsſchicht muß mit ſteigender Periodenzahl unendlich groß werden.

Wie die ohmſchen und kapazitiven Komponenten $R^{II}O$ und $R^{II}K$ eines komplexen Widerſtandes frequenzabhängig ſein müßten, wenn dieſer aus einer Stromverzweigung mit einem ohmſchen Zweig (W^{II}) und einem kapazitiven Zweig $\left(\frac{1}{\omega C^{II}}\right)$ beſtände, zeigen folgende leicht abzuleitende Gleichungen.

$$R^{II}O = \frac{W^{II}}{W^{II\,2}\,\omega^2 C^{II\,2} + 1} \qquad R^{II}K = \frac{W^{II\,2}\,\omega\, C^{II}}{W^{II\,2}\,\omega^2\, C^{II\,2} + 1}$$

Dieſem einfachen Geſetz folgt keins der Kurvenpaare. Am eheſten möchte man glauben, daß ſich das Syſtem in feuchter Luft durch den Steinwiderſtand R^I mit hintereinandergeſchalteter Stromverzweigung, beſtehend aus der Übergangskapazität und dem Übergangswiderſtand, darſtellen ließe. In trockner Luft möchte man dagegen roh noch eine zweite Verzweigung anſetzen, die ſich aus dem Widerſtand und der Kapazität der ausgetrockneten Achatſchicht zuſammenſetzt. Der erſte Fall läßt ſich, wie bereits geſagt, nicht ſo deuten, auch für den zweiten Fall liefert die zweite Annahme keine befriedigende Löſung, wenn man die Vorausſetzung macht, daß der Übergangswiderſtand in der Größenordnung 10^9 Ohm liegt, wie es die Gleichſtrommeſſungen zeigen, daß man ihn alſo gegenüber der Übergangskapazität vernachläſſigen kann. Natürlich kann man durch die Annahme mehrerer hintereinandergeſchalteter Stromverzweigungen die Kurven approximieren. Da man jedoch immer mit den Anomalien des Achats als Dielektrikum zu rechnen hat, über deren Abhängigkeit von der Schichtdicke, der Luftfeuchtigkeit

und vielleicht noch anderen Faktoren man nichts weiß, ſcheint mir eine ſolche Rechnung müßig. So muß ich dieſe intereſſante Frage offen laſſen, und meine Meſſungen können zu ihrer Löſung nur einen experimentellen Beitrag liefern.

II. Teil der Arbeit.

Untersuchungen am Huth-Johnsen-Rahbek-Lautſprecher.

Die im erſten Teil der Arbeit an dem Syſtem Stein-Platte auftretenden Erſcheinungen müſſen ſich auch in der Anordnung wiederfinden, die in der Technik vor allem benutzt wird, nämlich in dem Huthſchen Lautſprecher und Schnellſchreiber. Die wichtigſten Teile des Lautſprechers, deſſen Teile ich ausſchließlich in dieſem Abſchnitt meiner Arbeit behandeln will, ſind folgende:

Auf einer um eine metalliſche Achſe e rotierenden Achatwalze a (Durchmeſſer 28 mm) ſchleift ein dünnes Stahlband b (Breite 7 mm), das am oberen Ende auf der Mitte einer Glimmermembran c befeſtigt iſt und am unteren Ende durch eine Feder d geſpannt wird, wie Figur 6 im Querſchnitt zeigt. Die Achſe iſt mit der Walze leitend verbunden. Ein Zahnradgetriebe kuppelt ſie an einen kleinen Motor, der die Walze bei Betrieb des Apparates in der Pfeilrichtung mit circa 30 Touren pro Minute dreht. Dabei wird das Band infolge der Reibung ein Stück in der Rotationsrichtung mitgenommen, bis die geſteigerte Spannkraft der Membran, vermindert um die der etwas entſpannten Feder, gleich der Wirkung der Reibung iſt. Die neue Gleichgewichtslage hängt bei konſtanter Umlaufsgeſchwindigkeit der Walze von der Spannung des Bandes ab. Legen wir den einen Pol einer Gleichſpannung an die Achſe der ſich drehenden Walze, den anderen an das Band, ſo tritt die bekannte Anziehung auf, die annähernd dem Quadrat der Spannung proportional iſt. Dadurch wird die Reibung vermehrt und das Band um eine weitere kleine Strecke in eine

neue Gleichgewichtslage mitgenommen. Da einer beſtimmten elektriſchen Spannung eine beſtimmte Durchbiegung der Membran entſpricht, ſo werden periodiſche elektriſche Spannungsſchwankungen in Schwingungen der Membran umgeſetzt. Will man die Anordnung für Lautſprecherzwecke verwenden, ſo muß man der die Membran ſteuernden Wechſelſpannung eine genügend hohe Gleichſpannung überlagern. Nur ſo können poſitive und negative Amplituden Anziehung vermehrend und vermindernd oder umgekehrt wirken.

Die **Forderungen, die man an eine Anordnung ſtellen muß, wenn ſie ſich für Lautſprecherzwecke eignen ſoll,** ſind folgende:

1. Die Durchbiegung der Membran muß im Arbeitsgebiet proportional der Spannung ſein.
2. Die Amplitude der periodiſchen Kraft, die die Membran zum Schwingen anregt, muß bei unveränderter Wechſelſpannung unabhängig von der Frequenz ſein.
3. Die jeder Spannung entſprechende Gleichgewichtslage muß ſo ſchnell erreicht werden, daß dadurch die Kurvenform der akuſtiſchen Schwingung nicht weſentlich verzerrt erſcheint.
4. Die Lautſtärke muß ſelbſt bei langem Betriebe konſtant ſein.

ad 1.) Um zu unterſuchen, wieweit die erſte Forderung erfüllt iſt, wurde zunächſt die **Größe der Durchbiegung der Membran als Funktion einer senkrecht an ihr angreifenden bekannten Kraft** beſtimmt. Die Verſuchsanordnung zeigt Figur 7. Das Mikroſkop M wurde vor der Auflegung des Gewichtes auf einen Punkt in der Mitte der horizontal liegenden Membran B eingeſtellt, dann das Gewicht aufgelegt und das Mikroſkop wiederum auf den vorher anviſierten Punkt ſcharf eingeſtellt. Aus der bekannten Ganghöhe der Feineinſtellung des Mikroſkops ließ ſich ſo die Größe der Durchbiegung beſtimmen. Das Reſultat zeigt Figur 8. Die geringe Ausbiegung der Kurve nach oben, die man eher nach unten erwartet hätte, mag daher

ſtammen, daß die Membran zwiſchen Gummiſcheiben einge ſpannt iſt.

Andererſeits wurden **die an der Membran bei rotierender Walze angreifenden Kräfte abhängig von der angelegten Spannung** gemeſſen. Zu dieſem Zweck wurde ein Stahlband über die Walze gelegt, an deſſen einem Ende 100 gr hingen – entſprechend dem Zug der Feder in der Betriebsanordnung. Das andere Ende war an einer Federwage befeſtigt. An Band und Walze wurde dann eine variable Gleichſpannung angelegt. Die Zahlenangaben der Figur 10, die das Ergebnis enthält, ſind auf Länge und Breite des Lautſprecherbandes umgerechnet. Die Ordinate enthält die Kräfte, die auf die Membran wirken. Dieſe ſind um 1 : 3,4 kleiner als die Zugkräfte des Bandes, weil Band und Membran über einen ungleichſeitigen Hebel (ſ. Figur 7) in Verbindung ſtehen.

Figur 8 und 10 zuſammen ergeben in Figur 11 die geſuchte Abhängigkeit der Durchbiegung von der angelegten Spannung. Wir befinden uns alſo bſpw. bei 60 Volt Gleichſtromvorſpannung und 10 Volt Wechſelſpannung – beide Spannungen reichen zum Betrieb des Lautſprechers aus – in einem Gebiet gradlinien Kurvenverlaufs, mithin in einem Arbeitsgebiet, in dem **die erhobene Forderung erfüllt** iſt.

ad 2.) Zu zweit hatten wir verlangt, daß die Amplitude der periodiſchen Kraft, die die Membran zum Schwingen anregt, bei unveränderter Wechſelſpannung am Syſtem unabhängig von der Frequenz ſein müſſe. Dieſe Unabhängigkeit der Kraft von der Frequenz durch die Amplitude der entſtehenden Membranſchwingung zu prüfen, kann zu Fehlern führen, weil auch Reſonanzerſcheinungen, große Trägheit und Reibung des ſchwingenden Syſtems eine Frequenzabhängigkeit der Amplitude der erzwungenen Schwingung vortäuſchen könnten. Wenn man dagegen die Gleichſtromvorſpannung fortläßt und die Trägheit des ſchwingenden Syſtems ſoweit vergrößert, daß es nicht mehr mitſchwingen kann, ſo muß bei Anlegen einer Wechſelſpannung die jetzt konſtante Kraft, mit der an der Membran gezogen wird, der Schwingungsweite der bisherigen Membranſchwingung proportional ſein. Wir können alſo die in dieſem Abſchnitt geſtellte Aufgabe durch die einfache Meſſung einer gleichmäßigen Anziehungskraft löſen und benutzen dazu die in Figur 9 ſkizzierte Anordnung. Ein Mitſchwingen des Bandes wird dabei durch das 100 gr Gewicht auf der linken

Seite verhindert. Das Ergebnis zeigt Figur 12. Dieser Messung entspricht am ruhenden System die Bestimmung der Abhängigkeit der Anziehung von der Frequenz in Abschnitt b,4 des ersten Teils der Arbeit (S. 14–16). Wenn am rotierenden System die Frequenzabhängigkeit stärker zur Geltung kommt, so müssen hier außerdem nicht näher untersuchte Erscheinungen den Kurvenverlauf beeinflussen. Oberhalb der Frequenz 500 trat die Anziehung in den Bereich der Meßungenauigkeit der Anordnung. Soviel ist jedenfalls sicher, daß hier ein **schwerwiegender Mangel des Systems** zu Tage tritt, **der** allein schon **ein klangreines Arbeiten des Lautsprechers unmöglich macht.**

ad 3.) Die Verzerrung des Klangbildes, die durch den soeben besprochenen Fehler verursacht, wird, könnte noch dadurch verstärkt werden, daß **das Band bei emporschnellender Spannung nur mit der Drehgeschwindigkeit der Walze in die neue Gleichgewichtslage gelangen** kann. Umgekehrt wird, wenn die Sannung plötzlich 0 wird, die **starke Reibung das Band an einer augenblicklichen Rückkehr in die Gleichgewichtslage des spannungslosen Zustandes hindern.** Beschränken wir uns auf sinusförmige Frequenzen, so zeigt eine einfache Rechnung, daß die Betriebsdrehzahl der Walze (30 Umdrehungen pro Minute) ausreicht, die elektrische Schwingung einer Wechselspannung von 10 Volt während des Ansteigens der Spannung auch für hohe akustische Frequenzen einwandfrei zu übertragen, da nach Abschnitt 2 die die Membran steuernden Kräfte mit steigender Frequenz abnehmen. Ungünstiger scheinen die Verhältnisse für sinkende Spannung zu liegen, falls man diesen Schluß aus den Schriftproben des Schnellschreibers in Rottgardts Arbeit über „die elektrische Anziehung nach Johnsen-Rahbek und ihre Verwendung" (Zs. f. techn. Ph. 1921, Heft 11) ziehen darf. Hier sind nämlich die Ecken der Morsezeichen auf dem Schreibstreifen, die an sich rechtwinklig sein müßten, für fallende Spannung mehr abgeflacht als für steigende.

ad 4.) Während die vierte Forderung von den gebräuchlichen Lautsprechern erfüllt wird, ist das bei unserm Lautsprecher nicht der Fall. Ein erster bei allen benutzten Walzen

auftretender Mangel ſind die **im Rythmus der Umdrehungen der Walze auftretenden Lautstärkeschwankungen.** Sie ſtammen von Ungleichmäßigkeiten der Politur des Achats, die anſcheinend die Reibung beeinfluſſen.

Der zweite Nachteil iſt, daß bei längerem ununterbrochenen Betriebe die Lautſtärke abnimmt. Um dieſe Tatſache und ihre Gründe näher zu unterſuchen, mußte ich die Möglichkeit haben, Lautſtärken zu vergleichen. Zu dieſem Zweck habe ich folgende **Methode zur Messung von Lautstärkern** unter der vereinfachten Bedingung, daß ſtets mit ein und demſelben Ton gearbeitet wurde, ausgebildet und mit Erfolg benutzt. Ein gewöhnliches Telephon wurde als Mikrophon verwandt, die entſtehenden ſchwachen Wechſelſtröme durch einen Zwei-Röhrenverſtärker verſtärkt und über einen Transformator an das Gitter einer dritten Röhre gelegt, die auf dem unteren Knick der Kennlinie benutzt wurde. Unter Anwendung einer Kompenſationsſchaltung, durch die der Anodenruheſtrom im Meßzweig kompenſiert wurde, ließen ſich die durch die Wechſelſpannung am Gitter hervorgerufenen zuſätzlichen Anodengleichſtröme mit einem 10^{-6} Amp.-Inſtrument gut meſſen (Figur 13). Zur Vermeidung elektriſcher Beeinfluſſung durch die Zuleitungen zum Lautſprecher und durch deſſen Motor befand ſich das Telephon 1,5 m vom Lautſprecher entfernt. Aus demſelben Grunde mußte es zuſammen mit dem Verſtärker mit einer metalliſchen Kapſelung verſehen werden. Um unter ſolchen Umſtänden noch eine genügend große Lautſtärke am Telephon zu erzielen, ſtanden Lautſprechermembran und Telephon durch ein 20 mm weites Glasrohr in Verbindung. Zur Eichung der der Apparatur wurde die Abhängigkeit des Ausſchlags im Gleichſtrominſtrument von einem in den Verſtärker geſchickten bekannten Wechſelſtrom aufgenommen. Zu dieſem Zweck wurde das Telephon durch eine Spule erſetzt, die loſe an eine zweite gekoppelt war, durch die der variable Wechſelſtrom eines Tonſenders floß, der über ein Thermokreuz gemeſſen wurde. So wurde der Teil der Apparatur vom Verſtärker ab geeicht, nicht war aber damit die Abhängigkeit der elektromotoriſchen Kräfte im Telephon von der Lautſtärke bekannt. Es wurde angenommen, daß die an der Telephonmembran angreifenden Kräfte den Schwingungsamplituden der Lautſprechermembran proportional waren, und daß die Ausſchläge der Telephonmembran – und damit die elektromotoriſchen Kräfte im Telephon – durch eine lineare Beziehung mit dieſen Kräften zuſammenhingen. Unter dieſen Vorausſetzungen mußte ich die

gesuchte Eichkurve der gesamten Apparatur erhalten, wenn ich in der aufgenommenen Kurve der Abhängigkeit des Gleichstromausschlages von dem in den Verstärker fließenden Wechselstrom statt Wechselstrom Lautstärke schrieb. Das habe ich getan. Die Lautstärke ist also in beliebigen Einheiten angegeben. Angenommen, das als Mikrophon benutzte Telephon hätte in dem in Betracht kommenden Bereich keine lineare Charakteristik mehr gehabt, dann hätte das nur bedeutet, daß die Lautstärke mit wachsendem Instrumentenausschlag sich noch stärker geändert hätte, als die benutzte Eichkurve angab. Damit habe ich mich begnügt.

Die **Versuche** wurden vor allem mit zwei Walzen angestellt. Bei sämtlichen Versuchen betrug die Wechselspannung 20 Volt, die Frequenz 500/sek und die Vorspannung ± 64 Volt.

Ich bringe zunächst zwei Kurven, die die Abnahme der Lautstärke in mehrstündigem Betrieb zeigen. Es wurde dazu eine neue Walze und ein neues Band benutzt. (Figur 14) Es ergibt sich daraus: Bei Benutzung einer neuen Achatwalze und eines neuen Bandes erreicht die Intensität des Tones in Abhängigkeit von der Versuchsdauer nach circa einer halben Stunde ein Maximum und nimmt dann dauernd ab. Daß die Kurve mit positiver Vorspannung über der mit negativer liegt, hat nichts zu sagen, da ebenso oft auch das Umgekehrte eintrat. Als Grund für den Kurvenverlauf ist Verschmutzung des Bandes anzusehen. Das Stahlband reibt von der umlaufenden Walze Material ab. Der feine weiße Staub wird zwar durch eine langsam rotierende Plüschwalze von der Achatoberfläche abgewischt. Er kann sich aber auf dem Band festsetzen. Dadurch wird die Reibung vermehrt und so der Ton verstärkt. Die Vergrößerung des Abstandes zwischen Band und Walze vermindert andererseits die Anziehung. Der letzte Effekt überwiegt schließlich. Reibung vermehrend kann außerdem noch Staub wirken, der sich zwischen Band und Walze festsetzt. Als dritter Grund kommt die Wirkung der die Stromleitung im Achat besorgenden positiven oder negativen Ionen am Band hinzu. Diese Erscheinung spielte aber nur eine Rolle, wenn das Band längere Zeit benutzt wurde, ohne gereinigt zu werden. Bei Versuchen von 3–4 Stunden Dauer konnte der sich absetzende Schmutz nie als alkalisch oder sauer nachgewiesen werden. Erst bei Versuchen über 10 Stunden war das möglich. Dann trat stellenweise ein Verrosten des Stahlbandes ein, wenn es am positiven Pol der Gleichspannung lag, wie auch zu erwarten ist.

Ich faſſe zuſammen: **Bei einem neuen Band und einer neuen Walze erreicht die Lautstärke im Betrieb noch durchſchnittlich einer halben Stunde ihr Maximum und ſinkt dann dauernd ab. Grund iſt Verſchmutzung des Bandes durch Achatſtaub, Staub und elektrolytiſche Zerſetzungsprodukte.**

Solche Verſuche wurden 14 Tage lang wiederholt, da es ſich zeigte, daß die Lautſtärkekurven allmählich immer flacher wurden. **Schließlich tönte der Lautſprecher 20 Stunden hindurch bei beiden Richtungen der Vorſpannung mit gleicher konſtanter Lautstärke.** Eine Verſchmutzung des Bandes trat in dieſem Stadium faſt nicht mehr auf. Der Stahl des Bandes hatte ſich mit der Zeit ſpiegelblank gerieben. Die Lautſtärke war größer als bei den erſten Verſuchen. Ich nehme an, daß die Veränderung des Verhaltens daher ſtammt, daß die beiden Teile die Unebenheiten ihrer Oberfläche mit der Zeit auf einander abgeſchliffen hatten und nun reibungsloſer an einander vorbeiglitten. **Auch nach Erreichung dieſes Zuſtandes iſt die Empfindlichkeit des Syſtems im unüberwachten Dauerbetrieb nicht konſtant,** weil die Produkte der elektrolytiſchen Zerſetzung des Steins ſich mit der Zeit anhäufen und ſchließlich doch ſtören.

Ich möchte an dieſer Stelle der Anſicht widerſprechen, die Flüſſigkeit im Achat wandere im elektriſchen Felde einer der Elektroden zu, dadurch würde entweder das Band feucht und ſo der Übergangswiderſtand derart vermindert, daß der größte Spannungsabfall nicht mehr zwiſchen Achat und Band liegt, oder bei umgepolter Spannung der Stein am Band ausgetrocknet und die Schicht des größten Spannungsabfalles verbreitert. Gegen dieſe Annahme ſpricht folgendes:

1. Die Stärke des Gleichſtromes, der durch das Syſtem fließt, iſt unabhängig von der Richtung der Vorſpannung. Sie betrug eine Stunde nach Anſtellen des Lautſprechers 1 bis 3×10^{-6} Amp. und änderte ſich dann kaum noch, während ſie anfangs oft das 20fache davon betrug.
2. Unabhängig von der Richtung der Vorſpannung iſt auch die Konſiſtenz des ſich auf dem Bande abſetzenden Schmutzes.
3. Man ſollte meinen, daß ſich das Verhalten vollkommen änderte, wenn man die Walze innen nicht mit einer

Flüſſigkeit füllte, wie es im Huthſchen Lautſprecher der Fall iſt, damit zwiſchen der Innenfläche der Achatwalze und der ſpannungführenden Achſe guter Kontakt iſt, ſondern ſie zu dieſem Zweck innen mit einem leitenden Metallbelag verſieht. Die Verſuche, die ich mit einer Walze machte, welche innen durch Reduktion einer alkaliſchen Silberlöſung verſilbert war, zeigten keine Veränderung.

In welchen Grenzen Witterungseinflüſſe die Empfindlichkeit des rotierenden Syſtems beeinfluſſen, laſſe ich dahingeſtellt. Jedenfalls iſt aus den Verſuchen mit Stein und Platte zu folgern, daß es in vollkommen trockner Luft und im Vakuum verſagt. Es iſt nicht unmöglich, daß von dieſem Geſichtspunkt aus die Füllung der Walze mit Flüſſigkeit vorteilhaft iſt.

III. Teil der Arbeit.

Verſuche, die Achatwalze durch eine Metallwalze mit iſolierendem Überzug zu erſetzen.

In Anbetracht der beiden entſcheidenden Mängel des Syſtems, der Frequenzabhängigkeit der Anziehung und der Inkonſtanz der Lautſtärke, kam mir der Gedanke, ob man nicht auf anderem Wege unter Benutzung des gleichen Prinzips aber unter Vermeidung ſeiner Mängel weiterkommen könnte. Ich verſuchte, die Achatwalze durch eine Metallwalze mit dünnem iſolierendem Überzug zu erſetzen. Das Ganze ſollte einen Kondenſator darſtellen. Mit dem Johnſen-Rahbek-Prinzip würde eine ſolche Anordnung nichts mehr zu tun haben, ſie hätte aber wie der Huth-Johnſen-Rahbeck-Lautſprecher die Eigenſchaft, als Relais zur arbeiten und daher kaum Energie zu verbrauchen. Mit der Ausſchaltung des Halbleiters fiele auch der Grund für die Frequenzabhängigkeit fort.

Ich ſtellte 2 Verſuche an. Im erſten Verſuche nahm ich als **isolierende Schicht Öl**. Die rotierende Walze tauchte unten in

die Flüſſigkeit und wurde dadurch dauernd mit einer Ölhaut verſehen. Der auf dieſe Weiſe zwiſchen Walze und Band hergeſtellte Widerſtand war ſchwankend und bewegte ſich in der Größe von 10000 Ohm. Die Reibung war ſo gering, daß **merkliche Kräfte beim Anlegen von Spannungen nicht auftraten.** Daher wurde von einer weiteren Verfolgung des Gedankens abgeſehen. In dem Buch „Mikrophon und Telephon" von W. Mönch fand ich ſpäter, daß Feſſenden und Brant Rock die gleiche Anordnung für Empfangs- und Anzeigevorrichtungen zum Zweck der elektriſchen Nachrichtenübermittlung angeben. Für Lautſprecherzwecke ſcheinen auch ſie die Anordnung nicht verwandt zu haben.

Das Charakteriſtiſche des zweiten Verſuchs beſteht in der **Verwendung eines feſten Dielektrikums.** Eine Kupferwalze wurde mit einer 0,3 mm ſtarken Emailſchicht verſehen. Schon der einfache Verſuch mit einer ſolchen Walze anſtelle der Achatwalze zeigte, daß dieſer Weg gangbarer war. **Mit einer Verſtärkerröhre mehr als zum Betrieb des alten Lautſprechers gebraucht wurde, erzielte ich annähernd die gleiche Lautſtärke.** Ob man ohne zu ſtarke Vergrößerung der Berührungsfläche dahin kommen kann, die zugeſchaltete Röhre wieder fortzulaſſen, müßten eingehende Verſuche erweiſen. Ich möchte mich darauf beſchränken, die Wahrſcheinlichkeit hierfür zu zeigen. Nun entſpricht die Anziehung im elektroſtatiſchen Relais, alſo auch in der rotierenden Anordnung einem Plattenabſtand von rund $d = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ cm, eine Dielektrizitätskonſtante von $\varepsilon = 1$ gerechnet. Für $d = 9 \cdot 10^{-2}$ cm und $\varepsilon = 7$ (ε ſchwankt für Glas zwiſchen 6 und 9) ergibt ſich die neue Anziehung zu $\frac{7}{25^2}$ der alten, wenn das Dielektrikum gasförmig oder flüſſig wäre. Das wird anders nach den Überlegungen von Schering und Schmidt (Zs. f. techn. 1925, H. 1), die die Anziehung von zwei Kondenſatorplatten unterſuchten, wenn ſich zwiſchen ihnen ein feſtes Dielektrikum befindet. „Liegt hier die Elektrode – wie es im allgemeinen ſtets der Fall iſt – nur an wenigen Punkten wirklich berührend auf der Iſolierplatte auf, ſo bewirkt die Luftſchicht, die an den anderen Punkten Iſolierſtoff und Elektrode trennt, daß bei einem hochiſolierenden Dielektrikum, wie z. B. Schwefel, die Anziehungskraft bei Gleich- und Wechſelſpannung beliebiger Frequenz größer iſt als bei einem Flüſſigkeitsmedium gleicher Dielektrizitätskonſtante und zwar um einen Faktor, der nahezu gleich der Dielektrizitätskonſtante iſt." Die

Anziehung ist nur wenig von der Dicke der Luftschicht abhängig, solange diese klein gegen die Schichtdicke des Dielektrikums ist. Mithin müßte unter solcher Voraussetzung die $\frac{25^2}{7^2} = 15$ fache Fläche die gewünschte Anziehung bringen. **Bei Verdoppelung der Spannung würde man mit rund der vierfachen Fläche auskommen.** Einer solchen Spannungssteigerung ist allerdings durch die Durchschlagsfestigkeit der Emaille eine Grenze gesetzt – bei meinen Versuchen mit einer 0,3 mm starken, leider etwas blasigen Schicht 200 Volt Durchschlagsspannung entsprechend.

In der geringen Abhängigkeit der Anziehung von der Dicke der Luftschicht, solange sich diese innerhalb gewisser Grenzen hält, liegt auch der Vorteil, daß Störungen durch Staub oder Schmutz sich mit den bisher zur Reinigung der Walze verwandten Mitteln vermeiden lassen werden. Dagegen besteht ein großer Mangel der Emaille darin, daß sie kein hochisolierendes Dielektrikum ist. Legt man an Band und Walze eine Gleichspannung, so wandert innerhalb kurzer Zeit die Ladung vom Band durch **Oberflächenleitung** auf die Emailleoberfläche, sodaß jede Anziehung verschwindet. Im Betrieb mit einer Geichspannung, der eine Wechselspannung überlagert ist, äußert sich das darin, daß innerhalb von 10 Sekunden der Ton mit der doppelten Frequenz des Grundtones immer mehr hervortritt, bis der Grundton schließlich ganz verschwindet. Da dieser Vorgang immerhin verhältnismäßig langsam vor sich geht, läßt er sich vielleicht dadurch kompensieren, daß man die Oberflächenladungen der Walze durch Bürsten wieder abführt. Ein mit einfachsten Mitteln in dieser Richtung angestellter Versuch verspricht Erfolg.

Zuſammenfaſſung der Ergebniſſe.

Die Arbeit zerfällt in drei Teile:

I. Das elektroſtatiſche Relais.

II. Der Huth-Johnſen-Rahbek-Lautſprecher.

III. Verſuch, die Achatwalze durch eine emaillierte Kupferwalze zu erſetzen.

Zunächſt wurden an einem elektroſtatiſchen Relais die Verſuche von Kramer wiederholt und ſeine Behauptung von der Gleichrichterwirkung des Syſtems widerlegt (S. 7 – 8).

Nach einer Erläuterung der für die Meſſungen verwandten Apparatur (S. 8 – 9) wird zunächſt gezeigt, wie nach Anlegen einer Gleichſpannung der Syſtemwiderſtand mit der Zeit zunächſt ſchneller, dann langſamer kleiner wird. Die von Kramer erwähnte bei dem Relais auftretende Metallabſcheidung wird ausführlich unterſucht (S. 9 – 11).

Verſuche mit Wechſelſpannung bei verſchiedener Luftfeuchtigkeit und mit dem von der Pumpe erhaltenen Vakuum (3 mm Hg) ergaben eine ſtarke Abhängigkeit der Anziehung und des Widerſtandes von dieſen Faktoren in dem Sinne, daß in vollkommen feuchter und vollkommen trockner Luft und im Vakuum die Anziehung gering wird. Zur Erklärung wird angenommen, daß in feuchter Luft der Übergangswiderſtand bis zur Größe des Steinwiderſtandes abnimmt. In trockner Luft und im Vakuum ſoll der Stein an der Oberfläche austrocknen und dadurch ſchon ein beträchtlicher Teil der Spannung innerhalb des Steins abfallen (S. 11 – 14).

Für die durch die Verſuche feſtgeſtellte Abhängigkeit des Syſtemwiderſtandes von der Frequenz konnte eine quantitative Deutung nicht gegeben werden (S. 14 – 16).

Der zweite Teil der Arbeit beſchäftigt ſich mit dem Huth-Johnſen-Rahbek-Lautſprecher (S. 17 – 24).

Es wurden vier für die Anwendung wichtige Eigenſchaften unterſucht und gezeigt, daß

1. die Durchbiegung der Membran der angelegten Spannung proportional iſt (S. 18 - 19).
2. iſt die Amplitude der periodiſchen Kraft, die bei konſtanter ſinusförmiger Spannung die Membran zum Schwingen anregt, frequenzabhängig (S. 19 - 20).

3. fällt ein verzerrender Einfluß der geringen Umdrehungszahl der Walze für hohe akuſtiſche ſinusförmige Frequenzen infolgedeſſen fort (S. 20).
4. iſt die Lautſtärke von der Betriebsdauer abhängig, ſteigt zunächſt und ſinkt dann dauernd. Dieſe Veränderlichkeit nimmt durch wochenlanges Benutzen desſelben Bandes und derſelben Walze ab (S. 20 – 24).

Beſchreibung einer Methode zum Meſſen von Lautſtärken eines Tones konſtanter Höhe (S. 21 – 22).

Im dritten Teil der Arbeit werden Verſuche mit einer emaillierten Kupferwalze als Erſatz für die Achatwalze beſchrieben (S. 24 – 26).

Literaturverzeichnis.

1. R. E. Liesegang: Die Achate. Verlag: Th. Steinkopf, Leipzig 1915.
2. W. Mönch: Mikrophon und Telephon. Verlag: H. Meusser, Berlin 1925.
3. F. Pahl: Der Johnsen-Rahbek-Effekt und seine Verwendung. Verlag: R. C. Schmidt & Co., 1925.
4. K. Rottgardt: Elektrische Anziehung nach Johnsen-Rahbek und ihre Verwendung. Zs. f. techn. Phys. 2, 315-328, 1921.
5. E. Regener: Über Erzeugung von hohen Spannungen mit Hilfe des sogenannten elektrostatischen Relais. Zs. f. techn. Ph. 3, 222, 1922.
6. L. Bergmann: Über einige Messungen am elektrostatischen Relais. Zs. f. techn. Ph. 4, 11-14, 1923.
7. L. Bergmann: Ein einfaches elektrostatisches Relais für den drahtlosen Empfang. Jahrb. d. drahtl. Teleg. 21, 319-322, 1923.
8. Fr. Laube: Die Johnsen-Rahbek-Anordnung als galvanisches Element. Zs. f. d. phys. u. chem. Unterricht, 36, 186-187, 1923.
9. F. Waszik: Beitrag zur Erklärung der elektrischen Anziehung, die als Johnsen-Rahbek-Phänomen bezeichnet wird. Zs. f. techn. Phy., 5, 29-31, 1924.
10. A. Scekly: Über die Art des Elektrizitätsübergangs zwischen Metallen, die sich lose berühren. Zs. f. Phys. 22, 51-69, 1924.
11. W. Schottky: Über kalte und warme Elektronenentladungen. Zs. f. Ph., 14, 63-106, 1923.
12. Rohmann: Eletrische Kontakte. Ph. Zs. 21, 417, 699.
13. W. Kramer: Die Gleichrichterwirkung des sogenannten elektrostatischen Relais und die Erklärung der Wirkungsweise der Kontaktdetektoren. Zs. f. Ph. 27, 74-82, 1924.
14. A. Antinori: Über den Ursprung des Johnsen-Rahbek Effektes. Zs. f. Ph. 34, 705, 1925.
15. H. Schering und R. Schmidt: Die elektrostatische Anziehung bei festen Isolierstoffen. Zs. f. techn. Ph., 6, 41-49, 1925.
16. J. Wasik: Bemerkungen zum Beitrag von Herrn A. Antinori über den Ursprung des Johnsen-Rahbek-Effektes. Zs. f. Ph. 35, 720, 1926.

Zum Schluß danke ich Herrn Prof. Dr. K. Schmidt herzlich für die Anregung zu dieser Arbeit und das rege Interesse, das er ihr stets entgegengebracht hat. Der Dr. Erich F. Huth-G. m. b. H. bin ich für Überlassung des Lautsprechers zu Dank verpflichtet. Gern gedenke ich der kameradschaftlichen Hilfsbereitschaft von Herrn Etzrodt cand. phys.

Lebenslauf.

Am 1. Juli 1901 wurde ich, Martin Adolf Harniſch, zu Magdeburg als zweiter Sohn des Rektors Franz Harniſch geboren. Ich beſuchte die dortige Bürgerſchule und das Dom-gymnaſium, daß ich Oſtern 1920 mit dem Zeugnis der Reife verließ, um an der Univerſität in Halle Chemie zu ſtudieren. Im Februar 1923 beſtand ich den anorganiſchen und im Dezember desſelben Jahres den organiſchen Teil des Verbandsexamens. Schon vorher hatte ich mich in zunehmendem Maße mit Phyſik beſchäftigt und wandte mich ihr jetzt gänzlich zu. Oſtern 1924 begann ich auf Anregung von Herrn Prof. Dr. K. Schmidt im Inſtitut für angewandte Phyſik mit meiner Doktorarbeit, die mich 2 Jahre beſchäftigte.

Meinen Hallenſer Lehrern fühle ich mich zu großem Dank verpflichtet.

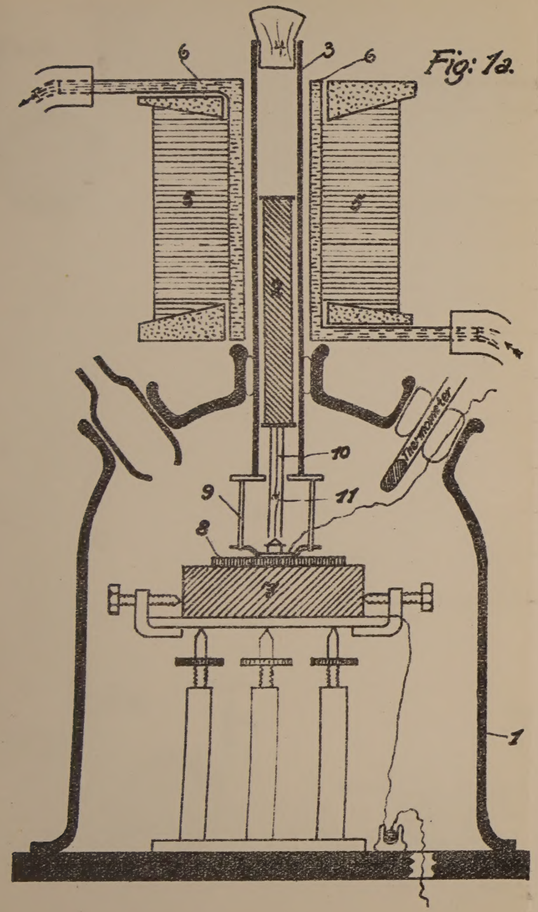


Fig: 1a.
6
3
6
5
4
10
9
11
8
7
1

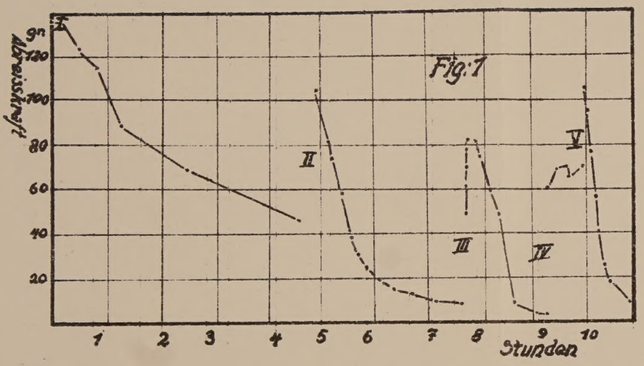


Fig: 1
Widerstand
Stunden
I
II
III
IV
V

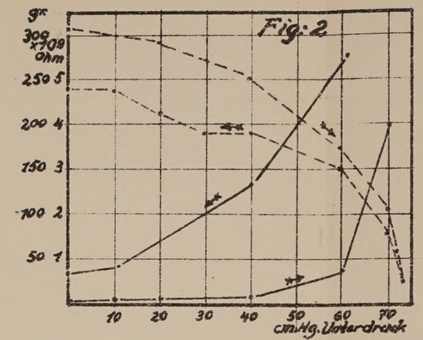


Fig: 2
cm Hg. Unterdruck

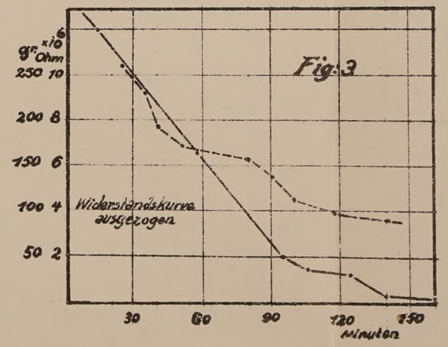


Fig: 3
Widerstandskurve ausgezogen
Minuten

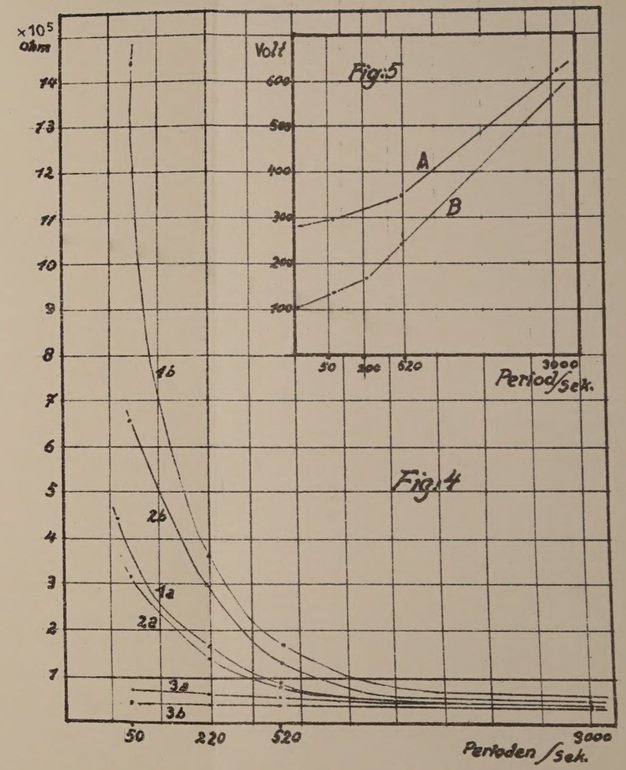


Fig: 4
Fig: 5
Volt
A
B
Perioden/Sek.
1b
2b
1a
2a
3a
3b

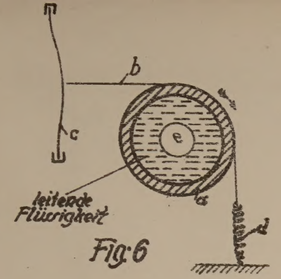


Fig: 6

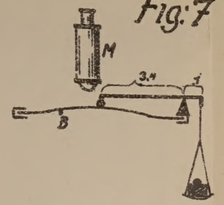
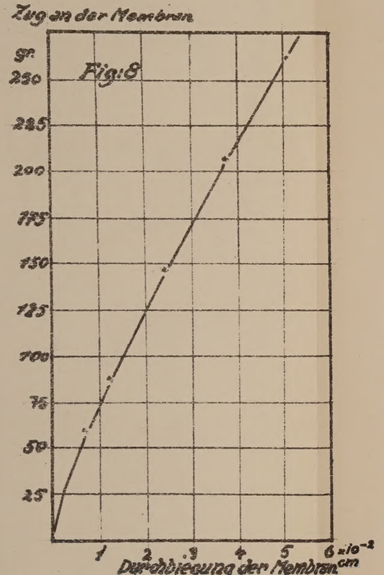


Fig: 7



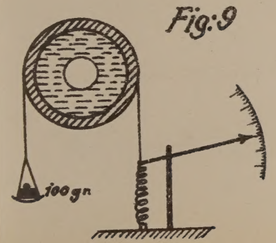
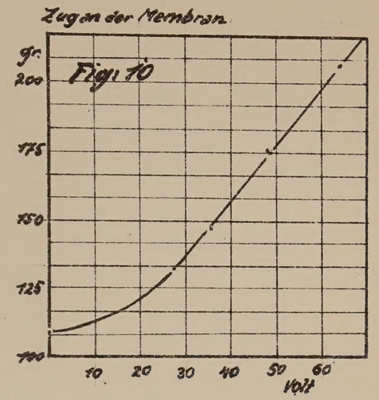
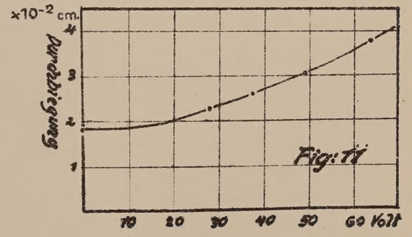
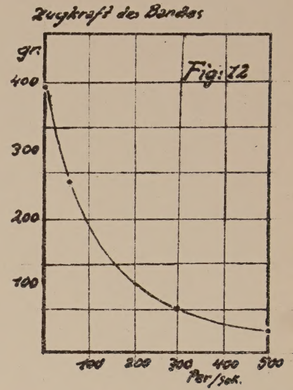


Fig: 9







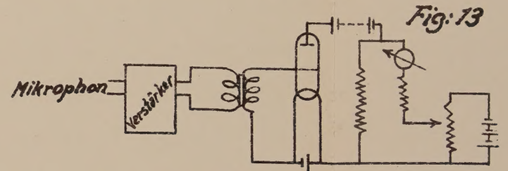
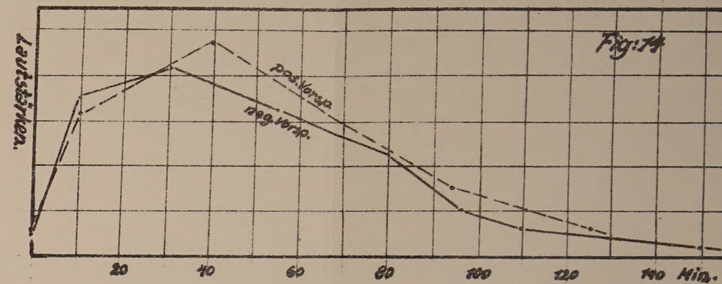



Fig: 13